

サンゴ礁海域における SPSS の長期観測と変動解析

仲宗根一哉・金城孝一・灘岡和夫¹⁾・宮川勝司²⁾・吉本昌弘³⁾・佐藤泰夫⁴⁾
 玉城不二美・渡口 輝・大城洋平・井上 豪・天願博紀

Long-term Monitoring and Analysis of content of Suspended Particles in Sea Sediment in Coral Reefs

Kazuya NAKASONE, Koichi KINJO, Kazuo NADAOKA¹⁾, Katuji MIYAGAWA²⁾,
 Masahiro YOSHIMOTO³⁾, Yasuo SATO⁴⁾, Fujimi TAMAKI, Akira TOGUCHI,
 Yohei OSHIRO, Go INOUE, Hiroki TENGAN

要旨：陸域からサンゴ礁海域への汚濁負荷の低減を図る上で、海域の自然浄化ポテンシャルを評価することは重要な課題であるが、定量的な評価はあまり進んでいない。サンゴ礁海域における底質中懸濁物質含量(SPSS)は、隣接する陸域からの土壌等の流入と台風や季節風等の波浪による底質攪乱によって変動するが、変動の大きさは土壌等流出源の出現時期、降水量、波浪の大きさおよび海域地形等によって異なる。本研究では、既存の SPSS、気象および波浪の長期観測データから SPSS の変動に及ぼす要因について定量的に評価するため、線形回帰分析により各海域の SPSS の変動を説明する基本モデルを導いた。また、モデルを用いて、海域に隣接する陸域で、シナリオ設定に基づいて赤土等流出量を削減した場合の SPSS 予測を行った。

Key words : 土壌流出 Soil Run-Off, 底質中懸濁物質含量 SPSS, サンゴ礁 Coral reef, 全国港湾海洋波浪情報網 NAWPHAS, 地域気象観測システム AMeDAS, 線形回帰 Regression analysis

I はじめに

沖縄県内ではまとまった降雨時に陸域からシルト以下の微細土粒子を多く含むいわゆる「赤土等」と呼ばれる土壌等が流出し、これに由来する濁水がサンゴ礁海域に流入して海面を濁らせる現象がしばしば見られる。土粒子の堆積が著しい場合、サンゴ礁生態系に悪影響を及ぼすことが知られている¹⁻²⁾。礁池内は接続する陸域からの汚濁負荷の影響を強く受ける一方、台風等の波浪による底質攪乱と外洋への移送の作用を受ける。これらの作用に起因する底質中懸濁物質含量(SPSS)の変動は、海域の土地利用や地理的環境、礁原の発達程度、海岸線の形状等の条件によって影響を受けることは容易に推察できるが、定量的な評価はあまり進んでいない。今後、サンゴ礁生態系の保全を目的に陸域からサンゴ礁海域への汚濁負荷の低減を図る上で、SPSS の変動を定量的に評価することが重要な課題となっている。本研究では、地理的環境や地形の異なるサンゴ礁海域で、SPSS の変動に気象や波浪がどの程度寄与しているのかを既存の SPSS 長期定点観測、気象観測および波浪観測のデータを用いて統計的に解析したので報告する。

II 方法

1. 観測値

(1)SPSS

沖縄県では 1995 年以降、赤土等汚染海域定点観測調査を 2008 年現在まで継続実施している³⁻¹⁴⁾(1997 年を除く)。この間、調査海域の削除・追加や一部定点位置の変更等があるため、ここでは 1998 年から 2007 年までの 10 年間の沖縄島 8 海域(平南川河口海域、源河川河口海域、赤瀬海域、平良川河口海域、漢那中港川河口海域、加武川河口海域、大度海域、アージ海域)と 1999 年から 2007 年までの 9 年間の石垣島 2 海域(宮良川河口海域、白保海域)計 10 海域、28 定点における底質中懸濁物質含量(content of Suspended Particles in Sea Sediment : SPSS)データを用いた。SPSS の測定方法および SPSS 値に対応する底質状況などについては、大見謝の報告¹⁵⁾に詳しい。海域に設置された定点は、基本的に海域に接続する河川河口または排水路末端を中心に、その正面および両側の計 3 地点で構成されるが、宮良川河口海域は 2 定点、白保海域では 4 定点となっている。なお、白保海域については調査期間を通じて SPSS の変動がほ

1) 東京工業大学 2) ㈱沖縄環境分析センター 3) ㈱沖縄環境保全研究所 4) いであ株式会社

*本研究は内閣府委託事業「赤土等に係る環境保全目標設定基礎調査」の一部として実施した。

とんど観測されない 2 定点を解析対象から除いた。

(2)気象観測値

1998 年から 2007 年までのアメダス気象観測値を用いた。降水量は調査海域近傍のアメダス観測地点の 10 分間、毎時および日降水量を用いた。風向・風速は 1 時間毎の 16 方位の風速値を用いた。

(3)波浪観測値

全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS), 略称ナウファスでは沖縄県内の那覇, 中城湾, 石垣および宮古の 4 箇所の長期間波浪観測値が一般に提供されている。ここでは, 那覇, 中城湾および石垣の 1998 年から 2007 年までの 10 年間の 2 時間毎の有義波高・周期および最大波高・周期を入手し, 解析に用いた。

2. 観測位置と組合せ

図 1 に調査海域, アメダス気象観測地点およびナウファス波浪観測地点を示し, 解析対象海域と対応するアメダス気象観測地点およびナウファス波浪観測地点の組合せを表 1 に示した。平良川河口海域では, 東アメダスの風向・風速記録がないため, 金武アメダスの観測値を使用した。また, 白保海域は石垣島の東海岸に位置しているが, 近傍の石垣アメダスが石垣島の南に位置するため, 降水量は石垣アメダス, 風向・風速は伊原間アメダスの観測値を使用した。

3. 海域の概要

表 2 に各海域の概要を示した。以下各海域の概要について述べる。

(1)平南川河口海域

河口付近は砂浜が見られ, 年間を通して河口閉塞が観察される。河口から北側と南西側は岩石帯となり, 沿岸と沖合に礁原は発達せず, 沖合 300 m まで水深 10m 以下が続く。西から時計回りに北の風で発達した波浪が観測されることが

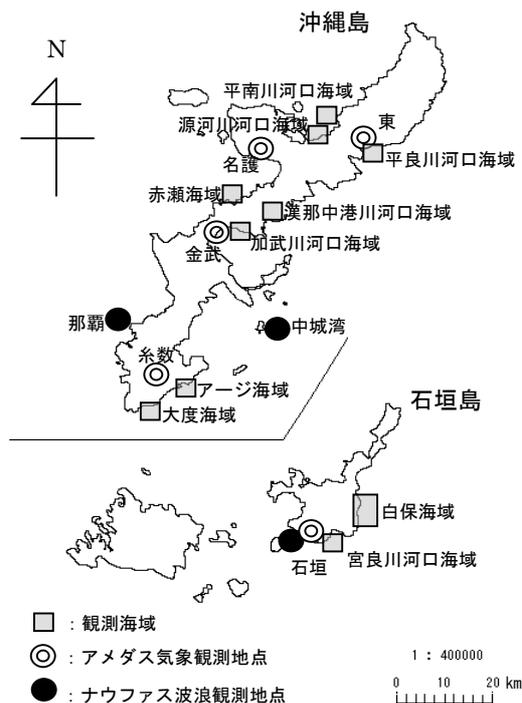


図 1. 解析対象海域と気象および波浪観測地点位置図

表 1. 観測地点の組合せ

海岸地域	海域名	アメダス気象観測地点		ナウファス波浪観測地点
		降水量	風向・風速	
沖縄島北部西海岸	平南川河口海域	名護	名護	那覇
	源河川河口海域	名護	名護	那覇
	赤瀬海域	金武	金武	那覇
沖縄島北部東海岸	平良川河口海域	東	金武	中城湾
	漢那中港川河口海域	金武	金武	中城湾
	加武川河口海域	金武	金武	中城湾
沖縄島南部南海岸	大度海域	糸数	糸数	中城湾
	アージ海域	糸数	糸数	中城湾
石垣島南海岸	宮良川河口海域	石垣	石垣	石垣
石垣島東海岸	白保海域	石垣	伊原間	石垣

表 2. 海域の概要

海 域 名	海岸法線の向き	前方礁原の有無	チャネルの大きさと数	海岸形状	前方礁原の干出	定点近傍流入河川・排水路	土壌等の主な流出源	礁原幅 (m)	礁池面積 (ha)
平南川河口海域	北西	無	-	直線	-	河川	農地	-	-
源河川河口海域	北西	無	-	直線	-	河川	農地	-	-
赤瀬海域	北西	有	小2	湾曲	無	排水路	農地	510	100.6
平良川河口海域	南東	有	大1, 小1	湾曲	有	河川	農地	650	519.8
漢那中港川河口海域	南南東	無	-	湾曲	-	河川	農地	-	-
加武川河口海域	南南西	無	-	直線	-	河川	米軍演習場	-	-
大度海域	南南東	有	小2	湾曲	有	排水路(地下湧水)	農地	220	33.5
アージ海域	南東	有	大1	直線	有	排水路	その他	2,080	373.6
宮良川河口海域	南	有	大2	湾入	有	河川	農地など多様	1,230	290.5
白保海域	東南東	有	大1, 小3	直線	有	河川	農地	900	300.7

ある。流域には牧草地を中心とした農地が広がっている。

(2)源河川河口海域

礁原に砂浜はなく、河口から北東側と南西側は護岸が続く、沿岸が見られ、沖合に礁原は発達していない。北および北西の風で発達した波浪が観測されることがある。流域にはサトウキビや園芸作物等の農地が点在している。

(3)赤瀬海域

岩礁帯と砂浜が交互に広がり、沖合に礁原が発達するが、低潮時に干出は見られない。西から時計回りに北西の風で発達した波浪が観測されることがある。流域には土地改良された農地がまとまってあるが、耕作放棄地も拡大してきている。

(4)平良川河口海域

河口付近に砂浜が広がり、沖合には発達した礁原が見られ、低潮時には広い範囲で干出する。礁池面積は500ha以上と広い。湾広く、湾奥に位置し、海上が荒れることは少ないが、海岸線が南向きのため、南の風で波浪が観測されることがある。隣接する陸域の丘陵地にはパインアップルを中心に農地が広がっている。

(5)漢那中港川河口海域

護岸沿いに僅かに砂浜が見られ、沿岸には岩礁帯が点在する。沖合には岩礁が僅かに見られる程度で、東から時計回りに南の風で発達した波浪が観測されることがある。流域には土地改良された農地がまとまっている。

(6)加武川河口海域

護岸沿いに僅かに砂浜が見られ、沿岸には礁原が見られる。沖合には岩礁が僅かに見られる。湾奥に位置し、海上が荒れることは少ないが、海岸線が南向きのため、南の風で波浪が観測されることがある。流域には米軍の演習場がある。

(7)大度海域

海域の東側には石灰岩の断崖があり、西側には岩礁帯が広がり、礁原を切断したような水路がある。礁原幅、礁池面積ともに小さいが、沖合に礁原が発達し、低潮時には干出する。礁嶺が発達しており、礁池内が荒れることはほとんどない。流域にはサトウキビやタバコを作付ける農地が広がり、地下ダムが整備されている。

(8)アージ海域

周辺には大きな河川は見られず、湾奥に排水溝がある。沖合に礁原が発達し、低潮時には干出する。礁原幅が2km以上と広い。海上が荒れることは少ないが、東から時計回りに南の風で波浪が観測されることがある。流域はサトウキビを中心とする農地である。

(9)宮良川河口海域

海岸沿いに砂浜が見られ、沖合に礁原が発達しているが、河口に向かって湾入し、河口前面は水深が深くなっている。

南東から時計回りに南の風で波浪が観測されることがある。流域はサトウキビを中心とする農地である。

(10)白保海域

海岸沿いに砂浜が見られ、沖合に礁原が発達しており、低潮時には干出する。南北に広い礁池を形成し、礁池北側には通路川河口から礁原を裂くような大規模なチャネルのトゥールグチがあるほか、イカグチ、モリヤマグチ、ブーグチの3つのチャネルが存在する。流域はサトウキビを中心とする農地が多いが、近年では、丘陵地を中心に牧草地が増加している。

III 結果

1. 統計値の概要

(1)SPSS

「赤土等汚染海域定点観測調査」では、1998年から2004年まで、年間のSPSS測定回数は4月下旬から5月上旬の梅雨期前、6月下旬から7月上旬の梅雨期後、10月上旬から11月上旬の台風襲来期後、1月下旬から2月中旬の冬季から季節風期の計4回が設定されていたが、2005年以降は、沖縄島の全海域で梅雨期後と台風襲来期後の年2回、石垣島の2海域で梅雨期前、梅雨期後、台風襲来期後の年3回の測定となっている。各海域定点のSPSS値の推移を図2に示した。1998年から2004年にかけて沖縄島のほとんどの調査海域でSPSSは減少傾向を示したが、2005年以降は沖縄島北部海域で上昇傾向に転じている。また、沖縄島北部西海岸の平南川河口海域、源河川河口海域、赤瀬海域では5、6月の梅雨期後にSPSSが上昇し、9、10月の台風襲来期後と1月の冬季季節風期に減少する明瞭な季節変動が見られる。表3に各海域定点の平均SPSSの統計値を示した。なお、SPSSは対数正規分布するため、平均値は幾何平均により、また、変動係数はSPSSを対数変換(常用対数)して算出した。平南川河口海域、源河川河口海域、赤瀬海域では定点の平均SPSSの変動が大きく、特に平南川河口海域では最高701kg/m³(泥状で砂が確認できない)に対し、最低0.6kg/m³(底質をかき混ぜても懸濁物質の舞い上がりを確認しにくい)と極端な変動を示す。沖縄島北部東海岸の平良川河口海域、漢那中港川河口海域、加武川河口海域、沖縄島南部の大度海域、アージ海域、石垣島の白保海域では、前述の3海域よりも定点の地点平均SPSSの季節変動はやや不明瞭となる。石垣島の宮良川河口海域ではSPSSの期間平均値が高く、また、期間を通して変動が少ない。

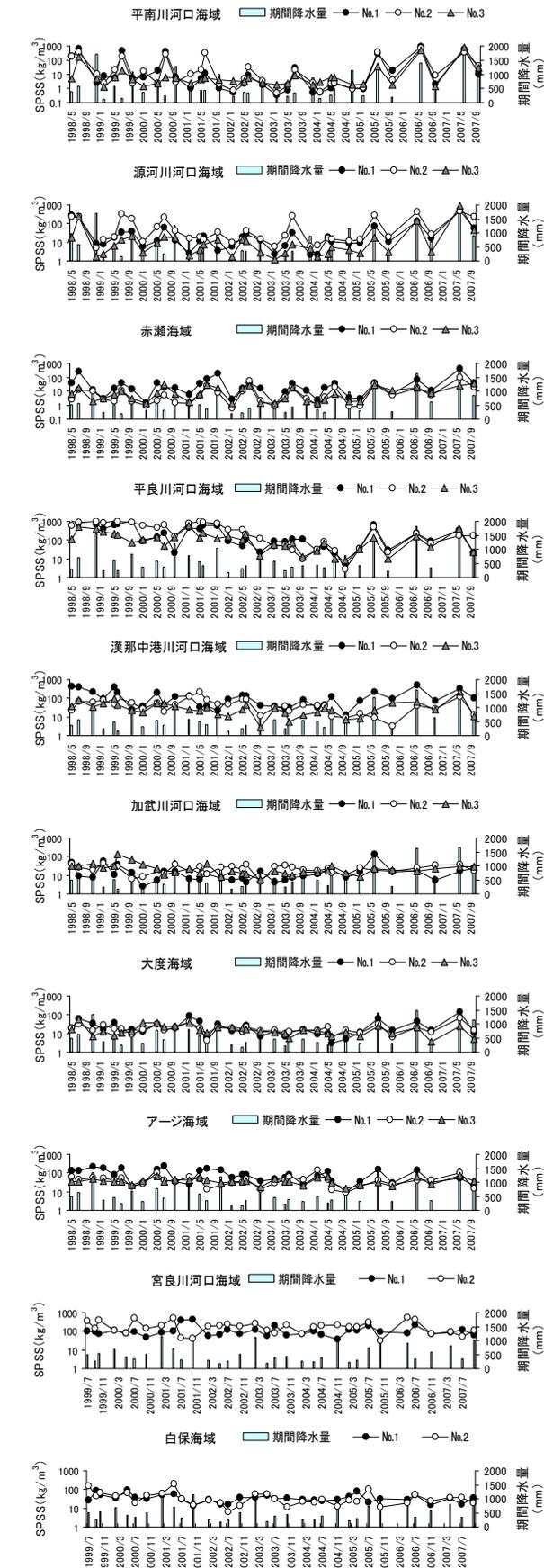


図2. 海域定点の SPSS と期間降水量の推移

(2)降水量

1998年から2007年までのアメダス年降水量の推移を図3に示した。各地点とも1998年から2003年にかけて、年間降水量は減少傾向であったが、2004年以降は増加の傾向を示している。また、沖縄県では1時間あたり降水量が50mm/h以上の異常降雨発生回数が増加傾向にあり(図4)、土砂災害発生件数も増加している(図5)。

表3. 定点平均 SPSS の統計値(1998-2007年)

海域	SPSS(kg/m ³)			変動係数
	平均	最高	最低	
平南川河口海域	8.0	701.0	0.6	0.92
源河川河口海域	17.0	615.2	2.5	0.48
赤瀬海域	7.7	96.6	1.0	0.58
平良川河口海域	130.4	709.0	4.9	0.26
漢那中港川河口海域	43.1	206.5	9.1	0.19
加武川河口海域	16.8	52.3	7.6	0.15
大度海域	16.1	61.3	5.2	0.21
アージ海域	43.9	102.1	11.2	0.14
宮良川河口海域	124.5	312.9	56.0	0.08
白保海域(No.1, No.2)	32.5	106.0	10.2	0.15

宮良川河口海域および白保海域は1999-2007年

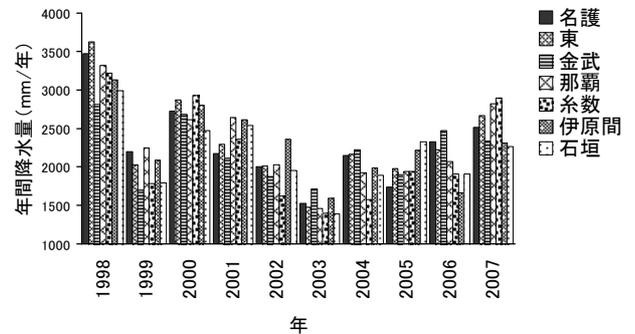


図3. アメダス観測地点の年降水量の推移(1998-2007年)

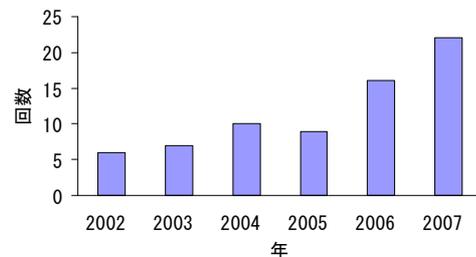


図4. 沖縄県における降雨50mm/h以上発生回数

沖縄総合事務局記者発表資料平成20年1月17日より作成

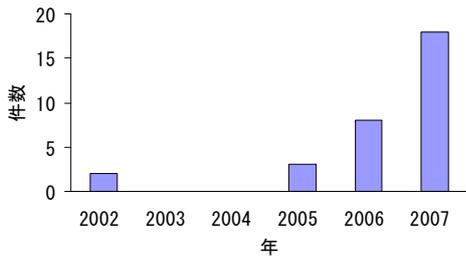


図5. 沖縄県における年間土砂災害件数

沖縄総合事務局記者発表資料平成20年1月17日より作成

(3) 風向・風速

1998年から2007年までのアメダス風向・風速の1時間ごとのデータから、風速1m/sを超える風と10m/sを超える風の風向別出現率を風配図として図6に示した。沖縄島の名護・金武・糸数アメダスでは、冬季には北から時計回りに北東の風が卓越し、夏季には東南東から時計回りに南南東の風が卓越する。10m/sを超える強風では、台風時の南東の風の出現率が高く、次いで冬季季節風の北向きの風が認められる。石垣・伊原間アメダスでは、冬季には北北東から時計回りに北東の風が卓越し、春季から夏季にかけては東から時計回りに南南西の風が卓越する。10m/sを超える強風では、石垣アメダスが台風時の南東から時計回りに南南西にかけて出現率が高く、伊原間アメダスでは西北西から時計回りに北西にかけて出現率が高い。

(4) 台風

1998年から2007年までに沖縄県に接近した台風のうち名護では1998年と2005年を除いて毎年20m/s以上の最大風速が観測されている。最大風速25m/s以上は2002年の台風16号、2004年の台風18号および2007年の台風4号で、10年間の最大観測値は2002年の台風16号の北の風28.7m/sである。那覇では、1998年、2005年および2006年を除いて毎年25m/s以上の最大風速が、1999年、2002年および2007年は30m/s以上の最大風速が観測されている。10年間の最大観測値は1999年の台風18号の南東の風32.2m/sである。また、2004年は台風の接近数が15回と例年に比べて多く、8月中旬から10月中旬にかけて、台風15号、18号、21号および23号が最大風速20m/s以上の強風を記録した。石垣島では1998年から2003年まで最大風速25m以上の台風の襲来はなく、1998年と2003年を除いて毎年20m/s未満で推移したが、2004年以降、4年連続して最大風速25m/s以上の台風が8回、うち最大風速30m/s以上では5回襲来するなど、勢力の強い台風の襲来を受けた。特に、2006年9月の台風13号は、石垣島で最大風速45.6m/sを記録し、221本の電柱を折損した。また、2007年10月の

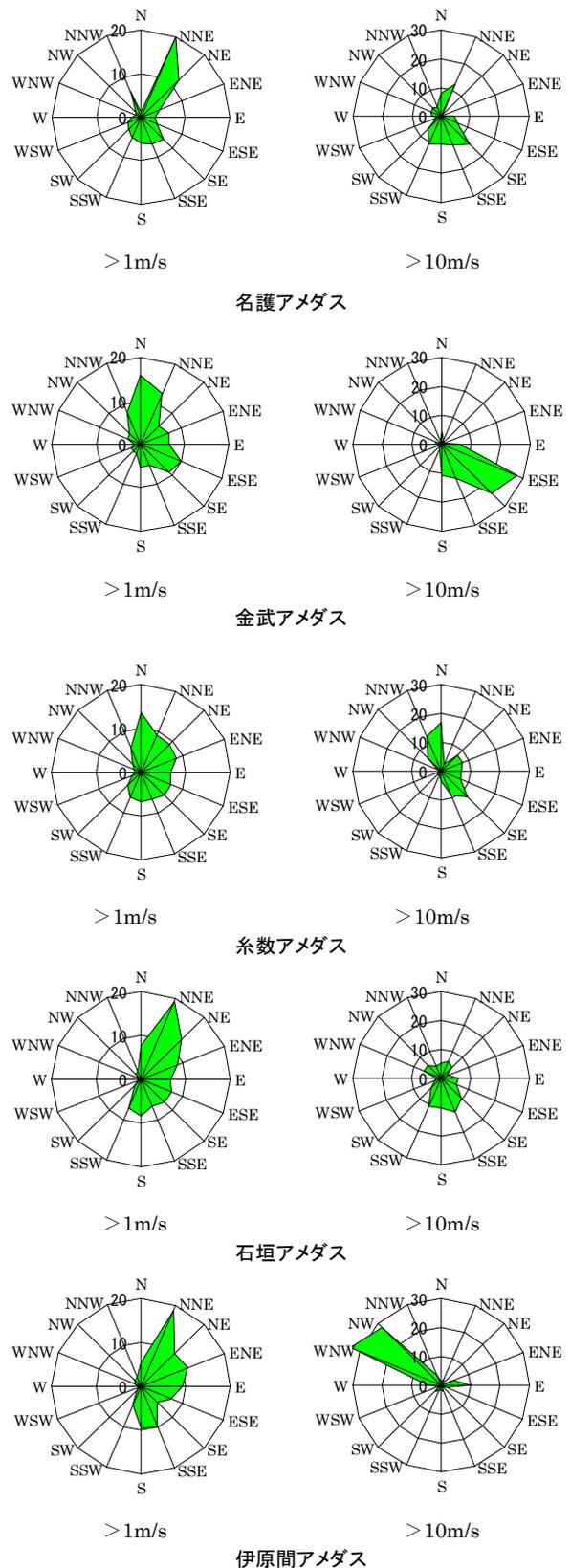


図6. アメダス気象観測地点における風配図(1998 - 2007年)

※レーダー図内の数字は出現率(%)

台風15号は石垣島川平で記録的な降雨と、石垣島東部の白保地域などで電柱が横倒しになるなど猛威を振るった。

(5)波浪

1)有義波

ナウファスの波高・周期は海面水位データから算出された波の総数から最も波高の大きい波を最大とし、波高の大きい順に波数の3分の1の個数の波高と周期を平均した波を有義波としている。図7に1998年から2007年までの10年間のナウファス観測地点の有義波高を時系列で示し、1998年から2007年までの10年間のナウファス観測地点の有義波・最大波の波高および周期の月別平均値を図8に示した。なお、統計値は欠測期間を除いて算出した。

①ナウファス那覇

波浪観測地点は沖縄島西の那覇港防波堤沖で、東シナ海に面する。有義波高、周期の平均値は、1.18m、7.37秒、最大波の波高、周期の平均値は、1.93m、7.72秒である。1月から5月にかけて有義波高は低下し、5月が最小となる。その後、5月から8月まではほとんど差はなく、9月から12月にかけて上昇し、1月が最大となる。周期に明瞭な季節変動は見られず、1月から5月にかけて緩やかに低下し、5月が最小となる。有義波高の平均値は1月の1.42mが最も高く、最大値は2001年10月の6.79mが最も高い。また、4mを超える有義波高の発生頻度は、9月が1.61%、12月が1.42%と他の月より高い。9月・10月は台風の影響、12月・1月は北よりの季節風の影響で大きな波が発生しやすい。

②ナウファス中城湾

波浪観測地点は沖縄島東の勝連半島南東の津堅島沖に位置し、太平洋に面する。有義波高、周期の平均値は、0.96m、6.48秒、最大波の波高、周期の平均値は、1.58m、6.46秒である。1月から6月にかけて有義波高はほぼ1m程度で推移し、6月が最小となる。その後7月から10月にかけて上昇し、10月が最高となり、1月にかけて緩やかに低下する。周期に明瞭な季節変動は見られず、6月が最小となる。有義波高の平均値は10月の1.45mが最も高く、最大値は2003年8月の9.60mが最も高い。また、4mを超える有義波高の発生頻度は、9月が3.68%、8月が3.16%と他の月より高く、8月から10月にかけては台風の影響で高い波が発生しやすい。

③ナウファス石垣

波浪観測地点は石垣島南西の石垣港防波堤沖、竹富島との間に位置し、高い波の発生頻度は極めて少ない。このため、各月の有義波高の頻度は1m以下が70%以上を占める。有義波高、周期の平均値は、0.29m、4.42秒、最大波の波高、周期の平均値は、0.52m、4.72秒である。1月から5月にか

けて波高は低下傾向を示し、5月が最小値となる。5月から8月までは波高平均値は0.2m程度で推移し、9月から1月にかけて0.3mを超えるが、月間差は小さい。周期に明瞭な季節変動が見られ、1月から6月にかけて低下傾向を示し、6月が最小となる。その後7月から12月にかけて上昇する。有義波高の平均値は1月の0.37mが最も高く、最大値は1998年10月の3.69mが最も高い。また、4mを超える有義波高の発生頻度は、9月が0.16%、12月が0.13%と他の月より高い。9・10月は台風の影響でうねりが発生しやすい。

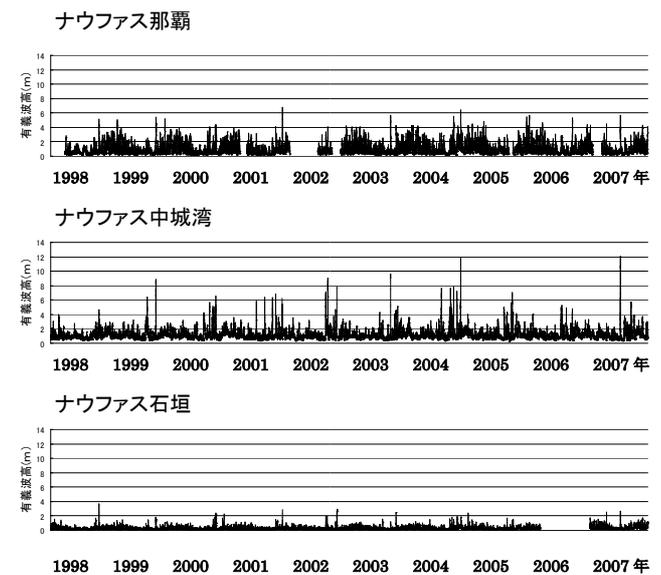


図7. 波浪観測地点の有義波高の推移

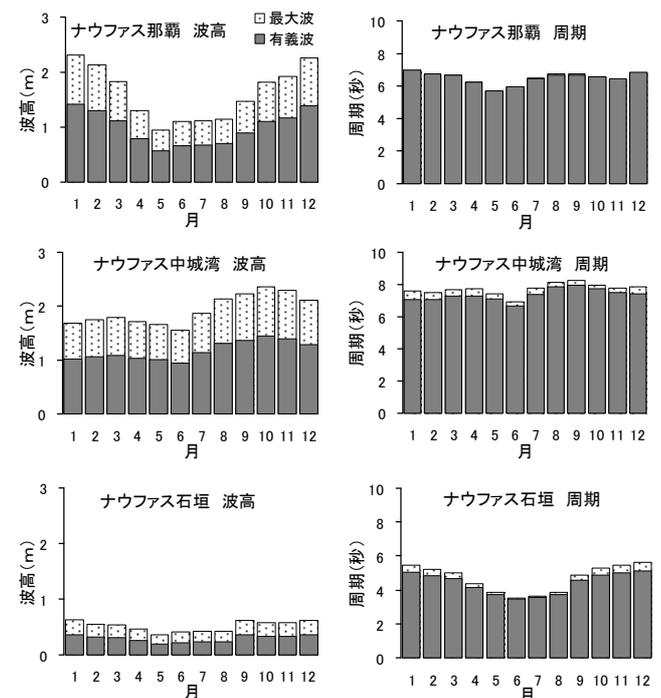


図8. 波浪観測地点の月別平均有義波高と周期

2) 波形勾配

波形勾配は、1つの波の波長に対する波高の比である。うねりは波長が長いので、緩やかな勾配を示し、波浪は波長が短く、波高が高いため急峻な勾配となる。1つの波について、勾配を ζ 、波長を L 、波高を H とすると、

$$\zeta = \frac{H}{L}$$

と表される。また、波長 L と周期 T の間には、

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \text{※ } g : \text{重力加速度}(=9.807\text{m/s}^2)$$

という関係があるので、波高と周期の関係は、次式で表すことができる¹⁶⁾。

$$H = \zeta \cdot \frac{g}{2\pi} T^2$$

勾配は、十分に発達した波浪の場合で概ね 0.03 程度、うねりの場合には 0.01 程度の値をとることが多く、勾配曲線に対する有義波と周期の分布を図示することで、観測波の性質を推察することができる。図 9 にナウファス波浪観測地点の有義波と周期の分布を示した。使用した有義波と周期は 1998 年から 2007 年までの 2 時間毎のデータである。ナウファス那覇およびナウファス中城湾では、勾配 0.05 を上限とする分布が見られ、ナウファス那覇では勾配 0.03 程度と勾配 0.01 程度に沿った分布が見られる。ナウファス中城湾では大きな波の発生頻度がナウファス那覇より高く、時に大きな波浪が観測される。ナウファス石垣では、概ね勾配 0.03 を上限とし、勾配 0.01 程度に沿った分布が見られ、発達した波浪が少なく、主としてうねりが観測される。

アメダス風向を東西南北 4 風向に分け、風向別の有義波高と周期の分布を図 10 に示した。名護アメダスとナウファス那覇の組合せでは、有義波高と周期は東と南の風で勾配 0.01 を中心に分布し、北と西の風では勾配 0.05 を上限とする勾配 0.03 に沿った分布を示す。北と西の風で波浪の特徴を持った波が発生しやすい。金武アメダスとナウファス那覇の組合せでは、有義波高と周期は東と南の風で勾配 0.01 を中心

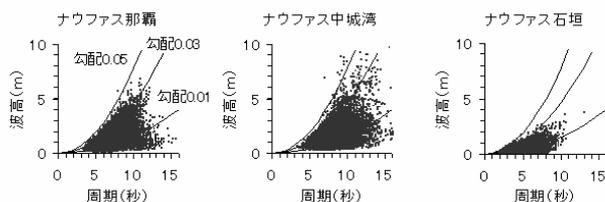


図 9. ナウファス観測地点の有義波高と周期の分布

に分布し、北と西の風では勾配 0.05 を上限とする勾配 0.03 に沿った分布を示す。北と西の風で波浪の特徴を持った波が発生しやすい。発達した波浪は北の風で卓越する。糸数アメダスおよび金武アメダスとナウファス中城湾の組合せでは、有義波高と周期は北と西の風で勾配 0.01 に沿った分布と、東の風で勾配 0.05 を上限とする勾配 0.03 に沿った分布と勾配 0.01 に沿った 2 つの分布があり、南の風で勾配 0.03 程度から勾配 0.05 程度を超える発達した波浪が観測される。石垣アメダスおよび伊原間アメダスとナウファス石垣の組合

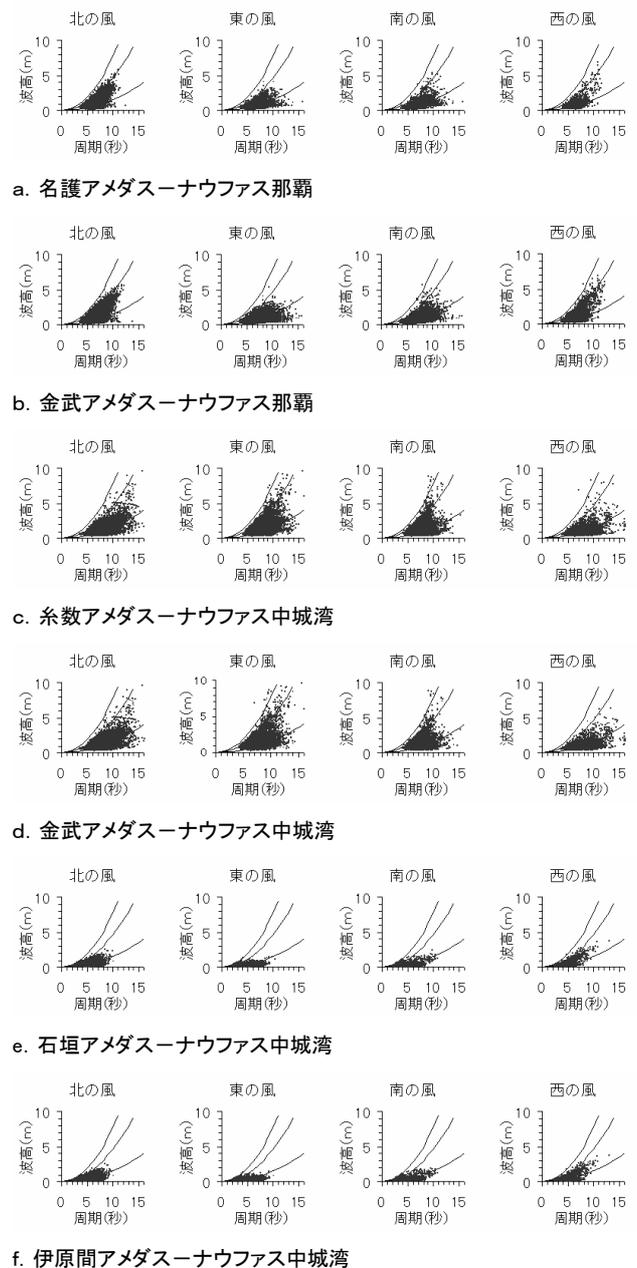


図 10. アメダスの風向別に見たナウファス有義波高と周期の分布

せでは、発達した波浪は少なく、有義波高と周期は西の風で勾配 0.03 と 0.01 の間に分布するが、北と南の風では勾配 0.01 付近に分布する。東の風で勾配が最も小さく、勾配 0.01 より下側の分布が見られる。

(6)有義波高と風向別風速の相関

ナウファス波高とアメダス風向別風速の相関係数を求め、レーダー図として、図 11 に示した。平南川河口海域および源河川河口海域は、沖縄島北部西岸の本部半島より北に位置し、北西から時計回りに北の風の影響を受ける。近傍の名護アメダス観測地点の位置が本部半島の付け根にあり、北西から西北西の風が標高の高い本部半島に遮蔽される。ナウファス那覇の有義波高と名護アメダスの風向別風速との相関係数は、南南西から時計回りに北北東にかけて高く、北東から時計回りに南にかけて低い。相関係数の最高は南南西の風 0.69、最低は東の風 0.21 である。赤瀬海域は沖縄島西岸の本部半島より南に位置し、北西から時計回りに北の風の影響を受ける。ナウファス那覇の有義波高と金武アメダスの風向別風速との相関係数は、南南東から時計回りに北北西にかけて高く、北から南東にかけて低い。相関係数の最高は北北西

の風 0.70、最低は東の風 0.18 である。平良川河口海域は、沖縄島北部東岸に位置し、東から時計回りに南の風の影響を受ける。アージ海域および大度海域は、沖縄島南の南東岸に位置し、東から時計回りに南の風の影響を受ける。ナウファス中城湾の有義波高と金武・系数アメダスの風向別風速との相関係数は、東北東から時計回りに南にかけて高く、南南西から時計回りに北北東にかけて低い。金武アメダスの相関係数の最高は南東の風 0.76、最低は北西の風 0.21 で、系数アメダスの相関係数の最高は南南東の風 0.77、最低は北の風 0.31 である。宮良川河口海域は、石垣島南岸に位置し、南東から時計回りに南の風の影響を受ける。また、白保海域は、石垣島東岸に位置し、北から時計回りに南の風の影響を受ける。ナウファス石垣の有義波高と石垣・伊原間アメダスの風向別風速との相関係数は、南南東から時計回りに北北西にかけて高く、北から時計回りに南東にかけて低い。石垣アメダスの相関係数の最高は西北西の風 0.88、最低は東の風 0.33 で、伊原間アメダスの相関係数の最高は西北西の風 0.88、最低は東の風 0.22 である。以上の結果から、白保海域を除き、ナウファス有義波高は対象海域付近の海上波浪と概ね対応していると考えられる。

IV 考察

1. SPSS 予測モデル

SPSS の変動は、主に陸域からの土壌流出による海底への土壌微粒子の流入・堆積と堆積後の波浪による底質の巻上げに続く懸濁物質の外洋への移送によってもたらされると考えられるが、海域に流入した土壌微粒子が礁池内に堆積する割合は、海域地形や気象条件および潮汐によっても異なり、礁池内に堆積した懸濁物質の外洋への移送は、海域地形に加えて潮流や波浪に強く影響を受けることが推察される。赤土等汚染海域定点観測調査は、調査時期を 4 月下旬から 5 月上旬の梅雨期前、6 月下旬から 7 月上旬の梅雨期後、10 月上旬から 11 月上旬の台風襲来期後、1 月下旬から 2 月中旬の冬期季節風時の 4 回に設定している(2005 年以降は、沖縄島の全海域で梅雨期後と台風襲来期後の年 2 回、石垣島の 2 海域で梅雨期前、梅雨期後、台風襲来期後の年 3 回)。そこで、このいずれかの観測時期の前後、 t_a および t_b において、ある海域の地点平均 SPSS をそれぞれ $SPSS_{(a)}$ および $SPSS_{(b)}$ とした時、SPSS を対数変換後、両者の差分 (1 回階差) を求めると、

$$\begin{aligned} \log_{10}(\Delta SPSS_{(a,b)}) &= \log_{10}(SPSS_{(b)}) - \log_{10}(SPSS_{(a)}) \\ &= \log_{10} \left(\frac{SPSS_{(b)}}{SPSS_{(a)}} \right) \end{aligned}$$

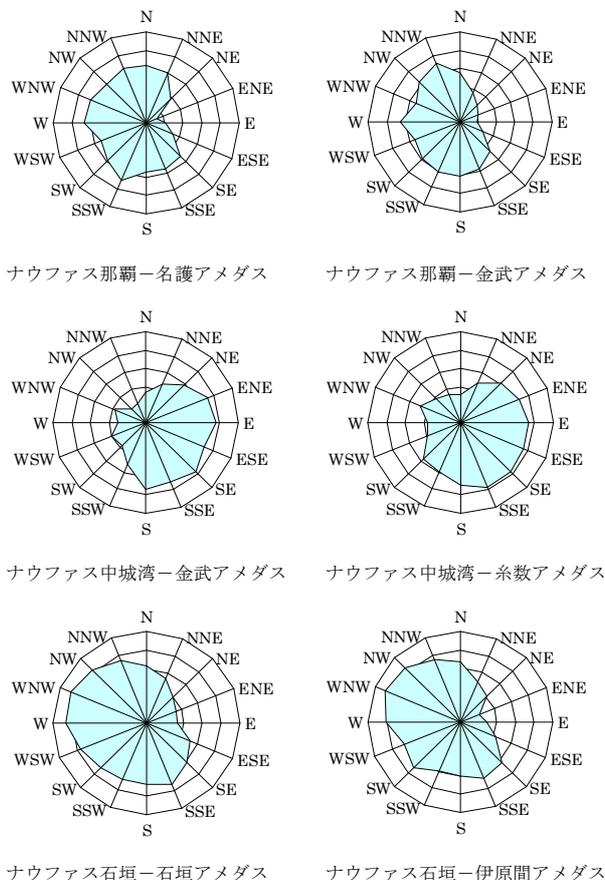


図 11. ナウファス有義波高とアメダス風向別風速との相関
目盛は 0.2 刻みの相関係数を表す

となる。したがって、観測期間における地点平均 SPSS 比の対数、 $\log_{10}(\Delta SPSS_{(a,b)})$ は観測期間の SPSS の増減を比で表すとともに、増加を正、減少を負の値で示す。各海域の観測期を梅雨期後から台風襲来期後および台風襲来期後から梅

雨期後に区分した地点平均 SPSS 比の推移を図 12 に示した。図から、2005 年以降、各海域で SPSS 変動の振幅が増大する傾向にあることがわかる。次に、各観測期前後における地点平均 SPSS 比を算出し、期間降水量、期間降雨係数、期間平均有義波高、期間最高有義波高および海岸線方向の期間風程の各変数との相関係数を求めた(表 4)。観測期間地点平均 SPSS 比と期間降水量、期間降雨係数の間には概ね正の相関が、また、期間平均有義波高、期間最高有義波高との間には負の相関が見られる。観測期間地点平均 SPSS 比を従属変数に、表 4 の項目を説明変数とする重回帰分析をステップワイズ法により行ったところ、7 海域について、有意な回帰が得られた(表 5)。しかし、調整済み決定係数は 0.15 - 0.491 であり、選択された変数では観測期間地点平均 SPSS 比の変動を十分に説明できない。SPSS 変動量に寄与する要因としてプラス方向には期間降水量、マイナス方向には白保海域を除いて期間最大有義波高が選択された。しかし、SPSS 変動量に対してマイナスに働く要因は波浪の大きさのみならず、赤土堆積量にも依存する。すなわち、赤土堆積量が多ければ、波浪により外洋に排出される赤土量は多いが、赤土堆積量が少なければ例え大きな波浪があっても外洋に排出される赤土量は少ない。そこで、期間始めの地点平均 SPSS を期間平均有義波高、期間最高有義波高および期間風程のそれぞれに

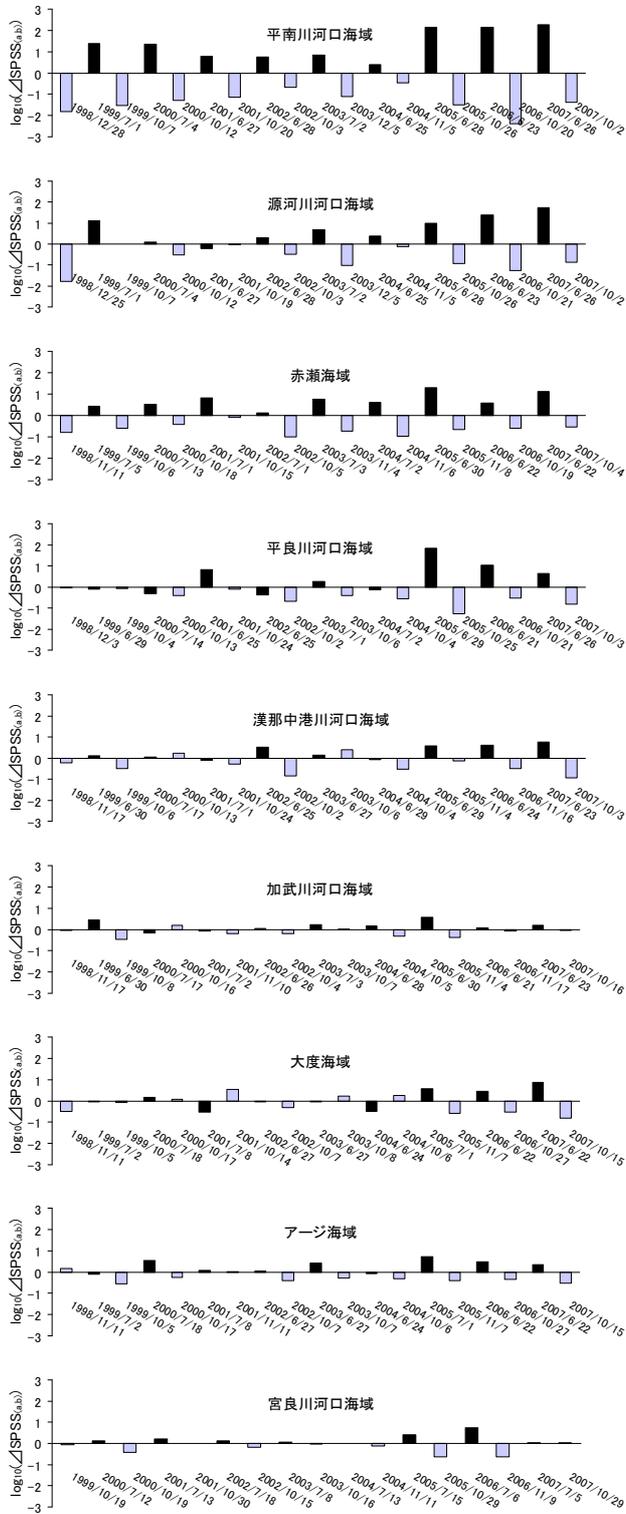


図 12. 観測期間における地点平均 SPSS 比の対数値の推移

■ : 梅雨期後-台風襲来期後 ■ : 台風襲来期後-梅雨期後

表 4. 観測期間地点平均 SPSS 比と各変数間の相関係数

海域	Pearson相関係数				
	期間降水量	期間降雨係数	期間平均有義波高	期間最高有義波高	期間風程
平南川河口海域	-0.048	-0.261	0.023	-0.433*	0.132
源河川河口海域	0.008	-0.183	-0.089	-0.305	0.159
赤瀬海域	0.106	0.061	-0.295	-0.572**	-0.239
平良川河口海域	0.399*	0.295	-0.308	-0.369*	-0.128
漢那中港川河口海域	0.213	0.122	-0.391*	-0.420*	-0.185
加武川河口海域	0.127	0.091	-0.296	-0.268	-0.227
アージ海域	0.270	-0.024	-0.295	-0.510**	0.071
大度海域	0.394*	0.130	-0.113	-0.376*	0.043
宮良川河口海域	0.068	0.125	0.024	-0.106	-0.047
白保海域	0.028	-0.040	0.466**	0.182	0.250

*p<0.05 **p<0.01

表 5. 観測期間地点平均 SPSS 比と各変数との標準偏回帰係数および調整済み決定係数

海域	標準偏回帰係数				調整済み決定係数
	期間降水量	期間最高有義波高	期間平均有義波高	期間風程	
平南川河口海域		-0.666**		0.470*	0.310
赤瀬海域	0.436**		-0.735**		0.491
平良川河口海域	0.892**			-0.730**	0.413
漢那中港川河口海域		-0.420*			0.150
アージ海域	0.318*		-0.539**		0.318
大度海域	0.427**		-0.411*		0.278
白保海域			0.464*		0.187

乗算したものを新たに説明変数として、ステップワイズ法による重回帰分析を行った。その結果、宮良川河口海域および白保海域を除く 8 海域に有意な回帰が得られ、最適モデルの調整済み決定係数は 0.352-0.77 と高く、選択された変数で地点平均 SPSS の変動をある程度説明できた(表 6)。

有意な回帰が得られた海域の地点平均 SPSS 予測モデルを漸化式として表 7 に示した。加武川を除いて重相関係数は 0.8 以上と高い。平南川河口海域、源河川河口海域および赤瀬海域では、SPSS 減少に対する波浪の寄与が大きい。沖縄島北部の西海岸は冬季季節風の影響を強く受けるためと考えられる。上記 3 海域に比べると、平良川河口海域、漢那中港川河口海域および加武川河口海域、沖縄島南のアージ海域および大度海域では、波浪による SPSS 減少への影響が小さい。これらの海域は位置的に冬季季節風の影響が少なく、東海岸の調査海域の多くは、内湾に位置しているためと考えられる。特に加武川河口海域は金武湾の湾奥にあり、地点平均

SPSS も低い値で推移しており、目立った流出源がないため、降雨の影響が明瞭ではない。また、大度海域は、水深が浅く、礁池面積が小さいうえ、東～南の強い風が吹くときに流れの早い離岸流が発生することが知られている。このため風による SPSS 減少への影響も示唆される。宮良川河口海域は、宮良湾の地形環境から、よほど強い台風の接近がなければ、礁池内に堆積した赤土等の攪乱が生じないことが示唆される。白保海域については、ナウファス石垣の波浪が白保海域沖合波浪と対応していないものと考えられる。

表 7 のモデルは、従属変数が一定期間における地点平均 SPSS の変動量(対数値)である。回帰式中の期間初めの地点平均 SPSS 値(log₁₀SPSS_(a))に観測値を逐一代入した場合には、期間終わりの SPSS 予測値(log₁₀SPSS_(b))と観測値はほぼ近似した値となり、SPSS の変動パターンも観測値と同様な傾向を示す。また、観測値は離散的であり、回帰式を時系列モデルとして取り扱うことは適当ではないが、回帰式に適切な SPSS 値(ここでは観測開始時の 1998 年 5 月の平均 SPSS 値)を初期値として投入し、SPSS 予測値を連続して計算した場合、計算値が観測値の変動に対してどのような追随性を示すかを確認した結果、計算値は観測値の周期的変動に対して概ね良い追随性を示した(図 13)。

2. 赤土等流出削減シナリオと SPSS 予測

SPSS 予測モデルの回帰式では、期間降水量が SPSS の増加に寄与する。期間降水量にかかる係数の大きさにより、陸域からの赤土等の流出しやすさがある程度評価できる。期間降水量にかかる係数は、土壌の侵食されやすさのほか、陸域の裸地出現時期や開発状況、赤土等流出防止対策の効果等の全てが反映されるため、実際には一律ではなく、それ自体も変動するものと考えられるが、ここでは約 10 年間の観測結

表 6. 観測期間地点平均 SPSS 比と各変数との標準偏回帰係数および調整済み決定係数

海域	標準偏回帰係数			調整済み決定係数
	期間降水量	期間初めの SPSS 対数値 × 期間平均有義波高	期間初めの SPSS 対数値 × 期間最高有義波高	
平南川河口海域	0.401**		-0.938**	0.666
源河川河口海域	0.369**	-0.885**		0.630
赤瀬海域	0.369**	-0.895**		0.770
平良川河口海域	0.446**	-0.290*	-0.498**	0.632
漢那中港川河口海域	0.335**	-0.490**	-0.424**	0.688
加武川河口海域		-0.610**		0.352
アージ海域	0.235**	-0.463**	-0.457**	0.712
大度海域	0.594**	-0.451**	-0.421**	0.676

*p<0.05 **p<0.01

表 7. 海域の地点平均 SPSS 予測モデル

海域	回 帰 式	(重)相関係数
平南川河口海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.998W_{\text{term}} - 0.240H_{\text{max}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.304$	0.829**
源河川河口海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.610W_{\text{term}} - 1.334H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.982$	0.808**
赤瀬海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.637W_{\text{term}} - 1.456H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.700$	0.886**
平良川河口海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.517W_{\text{term}} - 0.216H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) - 0.041H_{\text{max}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.589$	0.816**
漢那中港川河口海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.332W_{\text{term}} - 0.417H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) - 0.031H_{\text{max}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.817$	0.847**
加武川河口海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) - 0.392H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.551$	0.610**
大度海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.569W_{\text{term}} - 0.474H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) - 0.016W_d \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.635$	0.841**
アージ海域	$\log_{10}(\text{SPSS}_{(b)}) = \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.235W_{\text{term}} - 0.392H_{\text{mean}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) - 0.029H_{\text{max}} \times \log_{10}(\text{SPSS}_{(a)}) + 0.842$	0.860**

※log₁₀(SPSS_(a)): 観測期間始め地点平均 SPSS の常用対数, log₁₀(SPSS_(b)): 観測期間終わり地点平均 SPSS の常用対数

※W_{term}: 期間降水量(mm) × 10⁻³

※W_d: 期間風程(km) × 10⁻³

※H_{mean}: 期間平均有義波高(m), H_{max}: 期間最高有義波高(m)

*p<0.05 **p<0.01

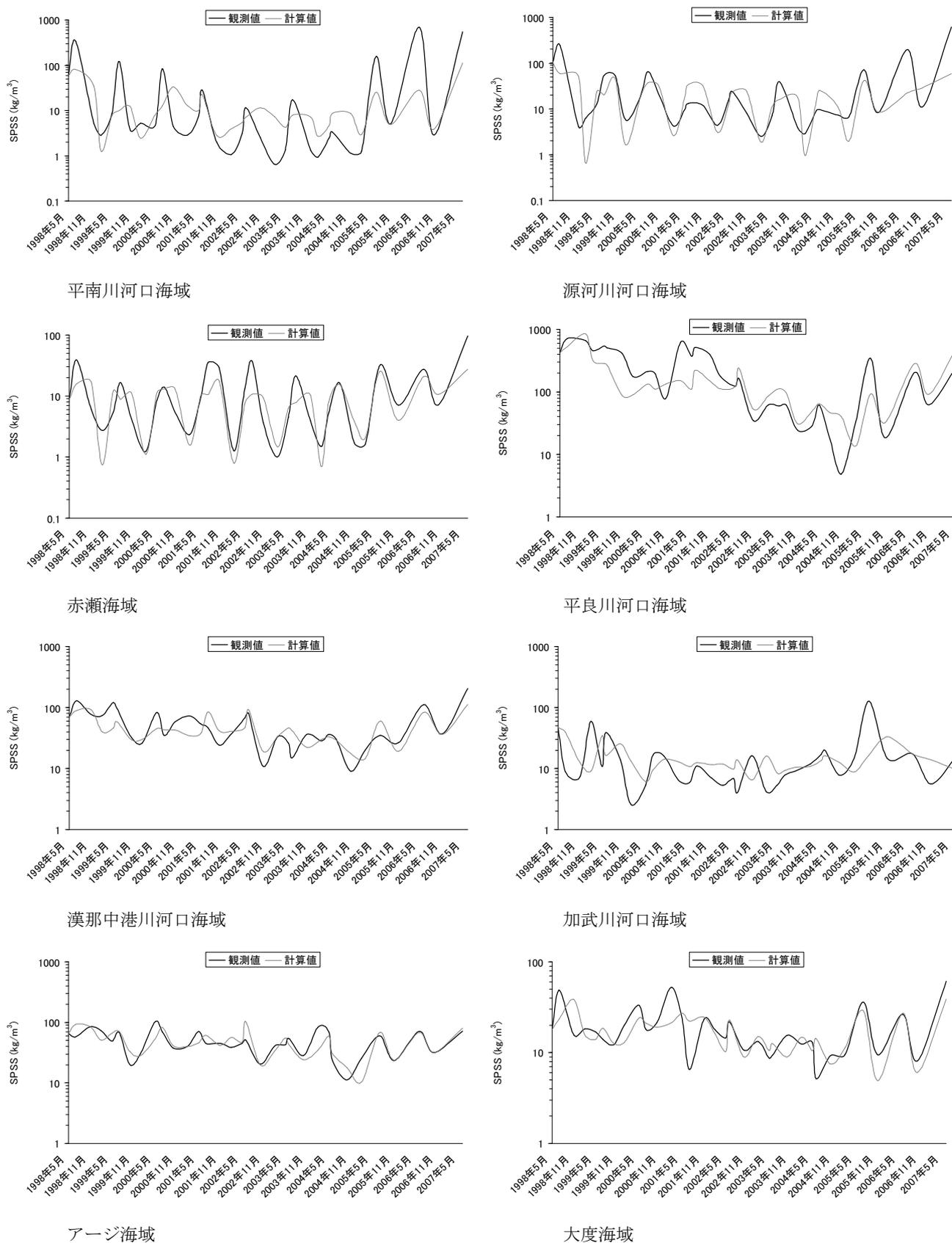


図 13. SPSS 観測値と予測モデル(回帰式)による連続計算値の時系列変動

IV 参考文献

果から得られた平均的な数値として捉えることができる。海域に接続する流域からの赤土等流出量が削減された場合、回帰式中の期間降水量の係数は現在よりも小さくなり、加武川河口海域のように目立った流出源がなくなれば、期間降水量の項目は回帰式から除かれるものと考えられる。したがって、回帰式中の期間降水量の係数を流域の赤土等流出削減率に見立てて変化させることで、地点平均 SPSS 値の将来予測が可能である。ただし、将来の期間降水量、期間有義波高については予測困難なので、ここでは、源河川河口海域を例に 1998 年 5 月から 2007 年 5 月までの観測値を用いて、毎年、前年の土壌流出量に対して一定比率で削減するように対策を実施するというシナリオを設定し、10 年間で SPSS 値がどのように変動するかを連続計算した。試算の条件として、毎年前年比 5%と 10%の削減率を設定した。SPSS の時系列変化を図 14 に示した。期間前半は、対策をとらない現状維持の場合と対策を取った場合の SPSS の変動に大きな違いは見られないが、期間後半からは赤土等流出削減の対策を取ったことによる SPSS のピークの低下が明瞭になる。流域の赤土等流出量を毎年前年比 5%削減する場合は、10 年目で無対策時の 40%まで流出量を削減することになり、10%削減の場合は同様に無対策時の 65%削減することになる。

健全なサンゴ礁生態系を維持するには、SPSS の年間最大値は 30kg/m^3 以下が望ましい²⁾。したがって、SPSS 予測モデルは、SPSS を指標とした陸域の管理計画に役立てられるものとして期待できる。しかし、ここで得られた SPSS 予測モデルは、限られた海域を対象に構築した経験式であり、沖縄全域を対象とするなら、赤土等の流出量に影響する陸域環境の要因や海域の赤土堆積と外洋への移送に影響する海域地形などの環境要因を整理し、陸域の土地利用と海域地形に対応できる汎用性の高いモデルを構築する必要がある。また、波浪データの観測値と対応しない海域もあることから、今後、波浪推算を利用したモデルの構築も検討する必要がある。

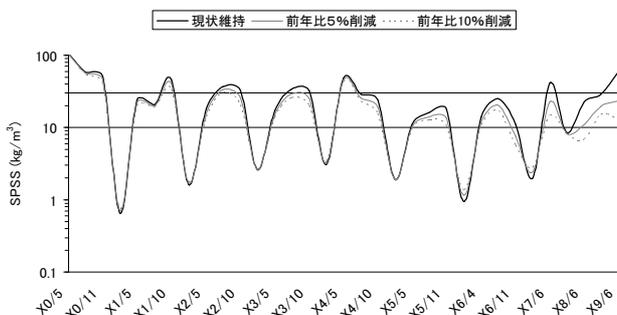


図 14. 赤土等流出削減シナリオによる源河川河口海域の SPSS 変動のシミュレーション

- 1) 大見謝辰男(1996)赤土堆積がサンゴに及ぼす影響. 沖縄県衛生環境研究所報, 30 : 79-86.
- 2) 大見謝辰男・仲宗根一哉・満本裕彰・小林孝(1999)赤土堆積がサンゴに及ぼす影響(第2報)ーサンゴの赤土堆積耐性についてー. 沖縄県衛生環境研究所, 33 : 111-120.
- 3) 沖縄県環境保健部環境保全課(1996)赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 4) 沖縄県環境保健部環境保全室(1997)平成 8 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 5) 沖縄県文化環境部環境保全室(1999)平成 10 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 6) 沖縄県文化環境部環境保全室(2000)平成 11 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 7) 沖縄県文化環境部環境保全室(2001)平成 12 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 8) 沖縄県文化環境部環境保全課(2002)平成 13 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 9) 沖縄県文化環境部環境保全課(2003)平成 14 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 10) 沖縄県文化環境部環境保全課(2004)平成 15 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 11) 沖縄県文化環境部環境保全課(2005)平成 16 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 12) 沖縄県文化環境部環境保全課(2006)平成 17 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 13) 沖縄県文化環境部環境保全課(2007)平成 18 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 14) 沖縄県文化環境部環境保全課(2008)平成 19 年度赤土等汚染海域定点観測調査報告書.
- 15) 大見謝辰男(2003)SPSS 簡易測定法とその解説. 沖縄県衛生環境研究所報, 37 : 99-104.
- 16) 舞鶴海洋气象台(2008年2月)経ヶ岬沿岸波浪観測 30 年報.
- 17) 大見謝辰男・古堅勝也・普天間朝好(1994)台風の波浪による堆積泥の浄化について. 第 28 回日本水環境学会年会講演集, 168-169.
- 18) 赤土等流出防止対策検討会(2001)技術者のための赤土等入門